

DC-1 雷达目标散射截面积测量设备

黄 刚 强

提 要 本文介绍 DC-1 雷达目标散射截面积测量设备的用途、测量方法、方块组成和所达到的主要指标。对测量误差作了初步估算，给出了某些测量结果，并提出了改进意见。

一、前 言

本设备用于测量静态目标的雷达截面积。

一般雷达都是用来测量目标在空间的位置和运动参数的。在研制雷达时，需要了解该雷达所应探测的目标的雷达截面积。如果要对地面的重要目标进行反雷达伪装，也需要测量复盖在目标上的材料的雷达截面积，要选用雷达截面积非常小的吸波材料。在研制飞机、导弹时，或者从外形设计上、或者在蒙皮上涂复吸波涂层，使雷达截面积减至最小，又希望飞行器所携带的用来干扰敌方雷达的金属丝、诱饵等的雷达截面积很大，以便于突防。如果要对雷达所探测到的目标进行识别研究，应测量目标回波的幅度及其变化规律，也需要测量目标的雷达截面积来进行分析。

所以，测量各种目标的雷达截面积，能为各种武器的研制提供可靠的数据，是很重要的带基础性的工作。

可以采用算法或测量法取得雷达截面积的数据。对于简单形体的目标，计算比较容易；对于复杂形体的目标，计算很困难，故多采用测量法；或既作理论计算，又进行测量，将所得数据进行对照分析。

静态目标雷达截面积的测量方法可分为两种：一种是在吸波暗室内用小模型代替实际的目标，雷达波长采用相同的缩尺，此法由于受到室内距离的限制，非平面波效应可能造成较大的误差。另一种是雷达靶场法，在室外对目标实体或相同尺寸的模型进行测量，此法远场条件较易满足，所得结果精度较高，但易受到外界电磁波的干扰。

在国外，为了对雷达和各种武器的研制提供基本数据和满足其他方面的需要，对目标雷达截面积的计算和测量十分重视，在这方面进行了大量的工作。我国这方面的工作做得较少。近几年来我们研制成功的 DC-1 静态目标雷达截面积测量设备，仅仅是在这方面做的初步工作，是为在室外测量目标实体回波幅度并自动计算出各个方位的雷达截面积这一用途而研制的一部自动化测量设备。

二、测量方法、方案选择、方块图组成和主要技术指标

用来确定一个目标对雷达所辐射的电磁波的散射特性的参数是雷达截面积，即用一个等效的和各向同性的反射体的截面积来表示。

一个目标的雷达截面积 σ 可由雷达距离方程求出^[1]：

$$\sigma = \frac{(4\pi)^3 R^4 P_r}{P_t G_t G_r \lambda^2} \quad (1)$$

式中 P_t 为发射功率，

G_t 为在目标方向上发射天线的增益，

P_r 为接收天线所收到的目标回波信号功率，

G_r 为接收天线在目标方向上的增益，

R 为目标与收、发天线之间的距离，

λ 为雷达所用波长。

由上式可以看出，如果用一部雷达来直接测量目标的雷达截面积的话，那就要同时将上式右边各个量测出然后将 σ 计算出来。要同时测出这几个参量并达到一定的精度，是不容易做到的，所以测量目标的雷达截面积通常采用比较法。

在(1)式中，如果 P_t 、 λ 、 G_t 、 G_r 和 R 以及各种损耗、测量场地的情况在测量时都保持不变，先测量一个标准的金属球(称为定标球，它的雷达截面积 σ_0 可由理论公式计算得出)，这时线性接收机输出电压为 V_0 ，放大量为 K ，则 $V_0 = KV_{r0}$ ， V_{r0} 为接收机输入电压。然后将标准球换成截面积为 σ_x 的待测目标，其位置不变，测得接收机输出电压为 V_x 。假定接收机与天线相匹配，可由(1)式导出：

$$\sigma_x = \frac{V_x^2}{V_0^2} \sigma_0 \quad (2)$$

因此，采用比较法求 σ_x 比较简便，只要求设备各参数在测量时保持稳定不变即可。所以DC-1测量设备采用比较法进行测量，其组成如图1所示。

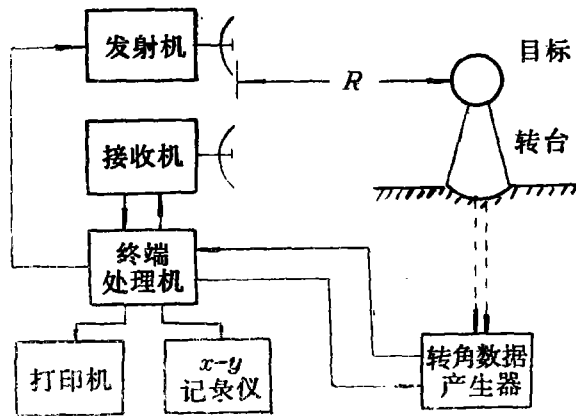


图1 DC-1单站测量方块图

DC-1 测量设备还可以进行双站测试,除测量目标的后向散射截面积外,还可以测量其它角度 θ 的散射截面积,如图 2 所示。

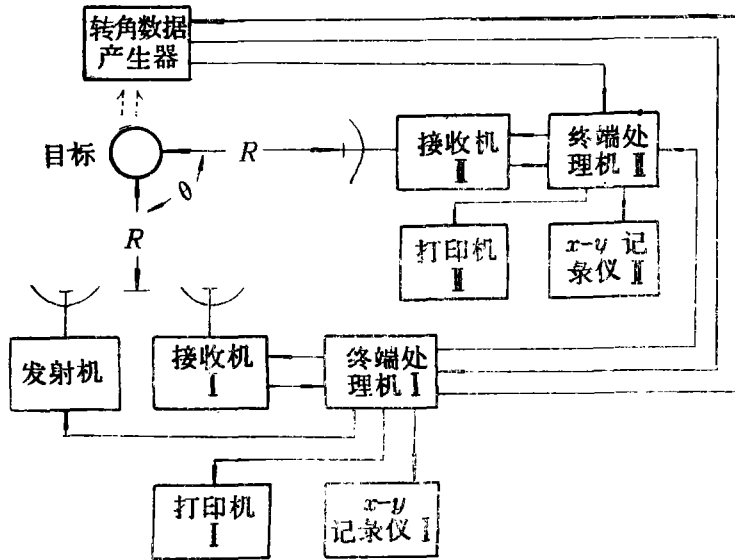


图 2 DC-1 双站测量方块图

测量设备如果采用连续波体制,那么成本可以较低,但要求接收机与发射机和它们的天线之间有良好的隔离,而且在区分目标回波和背景回波上会遇到困难,需要采取专门措施来抵消背景回波。若采用连续波调频体制,则在短距离测量时要求单位时间的频移大,并要消除寄生调幅的影响。

DC-1 测量设备采用脉冲体制,以便从时间上将发射信号、目标回波和较远的背景回波区别开。发射脉冲宽度 τ 要选得恰当,要在 $c\tau/2$ (C 为光速) 内能将整个目标复盖上,并使终端采样脉冲能对准回波较平坦的部分。还应满足 $\frac{c\tau}{2} < R$, 且脉冲后沿应很陡,使目标回波到达接收机时发射脉冲已衰减到足够小,从而减小由它引起的测量误差。

对于一个复杂形体的目标,当入射的电磁波方向不同时,它各部分散射的电磁波相位也不同,使接收的合成信号幅度变化很大,要求接收机能够不失真地加以放大,因此接收机的线性动态范围应与之相适应。

为了如实地反映目标各方向上回波信号的大小,获得较高的测量精度,基本上实现测量自动化,对整个测量系统要求是比较高的。

要求发射和接收天线副瓣应足够小,两个天线之间的隔离比足够大,天线支架应牢固可靠,方位和俯仰角调整后能够锁定以减小阵风对天线增益的影响。

对发射机要求稳频、稳幅、频率可变和发射功率可以调整。

对接收机要求增益稳定度高,动态范围大,线性好,灵敏度较高。

终端处理机(图 3)应能做到:1. 把测量定标球时接收机输出电压 V_0 加以平滑并存储下来,再存入由理论公式计算所得的定标球的雷达截面积值 σ_0 ; 2. 测出待测

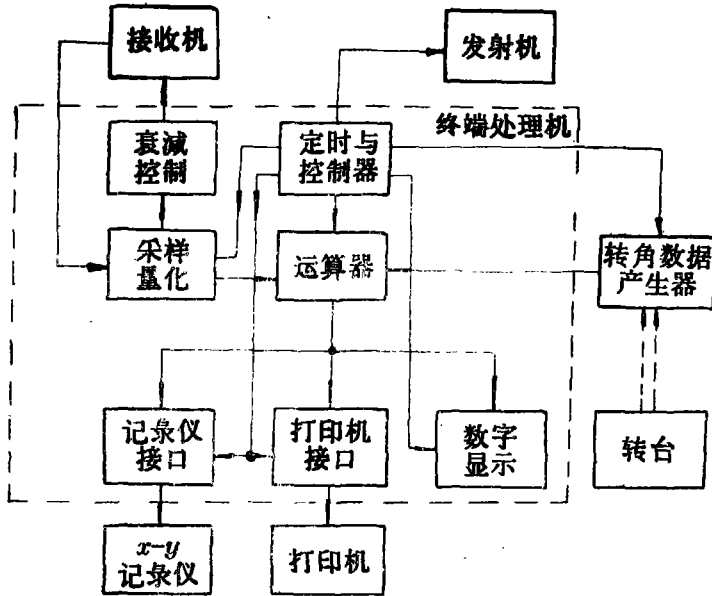


图 3 终端处理机原理方块图

目标的接收机输出电压 V_x 后, 实时地按公式(2)算出 σ_x 值; 3. 将转台角度数据发送器送来的角度值和对应的 σ_x 值及时送给打印机和 $x-y$ 记录仪记录下来; 4. 控制接收机衰减器的通断; 5. 协调各分机的工作; 6. 协调双站测试时的工作。

要求测量靶场的场地应平坦开阔, 树木、建筑物等应远离目标。

目标转台应隐蔽在地表平面以下, 用反射系数很小的泡沫塑料支架或尼龙绳支撑目标, 其形状应使由它引起的反射信号最小。有足够的机械强度, 能承受目标的重量而不变形。能控制目标均匀、平稳地旋转。配上角度数据发送器, 能准确及时地送出角度数据。

为达到上述要求, DC-1 测量设备的三个主要分机采取了以下措施:

1. 发射机 如图 4 所示。

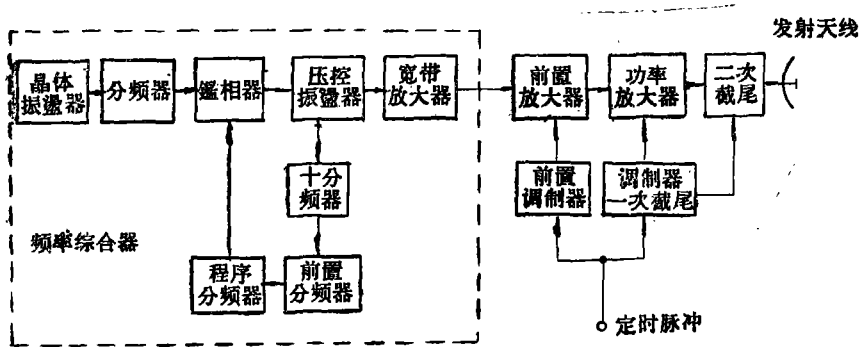


图 4 发射机简化方块图

采用了恒流的石英振荡器和数字分频、锁相技术等构成频率综合器, 使得在整个设

3. 终端处理机 如图3所示。

它是一台能完成上述六项功能的专用计算机, 将接收机输出电压采样、量化并控制接收机的衰减器, 对回波信号适当进行平滑以减小随机误差, 为了进行实时计算, 采用对数查表法算出目标雷达截面积的分贝数, 送给打印机和 $x-y$ 记录仪将测量数据记录下来。

三、对误差的估算和测量结果举例

前面已经提到, 采用比较法测量目标雷达截面积, 必须使公式(1)中的各参量保持稳定。这里主要估算由于这些参量不稳定所造成的测量误差。

在室外测量时通常选择比较好和比较稳定的天气, 因而电波传播条件和传输线损耗的变化认为可以忽略。

由设备的参数不稳定和非线性造成的测量总误差的均方根值用 δ 表示。这些参数的不稳定又是由许多因素造成的, 故可假定各参数造成的误差服从正态分布又彼此独立。由于频率稳定度达 10^{-7} , 可以忽略由它的不稳定造成的误差。由资料[3]第95页可得:

$$\delta^2 = \delta_1^2 + \delta_2^2 + \delta_3^2 + \delta_4^2 + \delta_5^2 \quad (3)$$

式中 δ_1 表示由发射机功率 P_t 的变化引起的目标的 σ_x 的误差的均方根值,

δ_2 表示由接收机的放大量 K 的变化引起的 σ_x 的误差的均方根值,

δ_3 表示由发射天线增益 G_t 的变化引起的 σ_x 的误差的均方根值,

δ_4 表示由接收天线增益 G_r 的变化引起的 σ_x 的误差的均方根值,

δ_5 表示由接收机噪声、系统非线性等引起的 σ_x 的误差的均方根值。

把它们化为相对均方根误差, 由资料[3]中96页可得

$$\begin{aligned} \left(\frac{\delta}{\sigma_x}\right)^2 &= \left(\frac{\delta_1}{\sigma_x}\right)^2 + \left(\frac{\delta_2}{\sigma_x}\right)^2 + \left(\frac{\delta_3}{\sigma_x}\right)^2 + \left(\frac{\delta_4}{\sigma_x}\right)^2 + \left(\frac{\delta_5}{\sigma_x}\right)^2 \\ &= \left(-\frac{\delta P_t}{P_t}\right)^2 + \left(2\frac{\delta K}{K}\right)^2 + \left(-\frac{\delta G_t}{G_t}\right)^2 + \left(-\frac{\delta G_r}{G_r}\right)^2 + \left(2\frac{\delta V_x}{V_x}\right)^2 \end{aligned} \quad (4)$$

式中 $\frac{\delta P_t}{P_t}$ 为发射机功率的稳定度, 实测得 $\leq 1\%$,

$\frac{\delta K}{K}$ 为接收机放大量 K 的稳定度, 测量得 2% ,

$\frac{\delta G_t}{G_t}$ 为发射天线增益的相对变化的均方根值, 假定为 2% ,

$\frac{\delta G_r}{G_r}$ 为接收天线增益的相对变化的均方根值, 亦假定为 2% ,

$\frac{\delta V_x}{V_x}$ 为接收机噪声及系统非线性造成的测量误差的均方根值, 把测量所得数据进行计

算, 得均方根值为 2.04% 。

把上述数值代入式(4), 计算得:

$$\left(\frac{\delta}{\sigma_x}\right)^2 = 29.1616 \times 10^{-4}$$

故估计由于设备参数不稳定引起测量目标雷达截面积的相对均方根误差为 5.4%。

除此之外, 最主要的其他的误差来源是背景误差, 它是由支架和目标附近的地面和地物反射的回波从天线主瓣或副瓣进入而造成的误差。还有因标准球做得不圆、球的直径测量不准、理论计算公式的近似、电磁波的非平面照射目标等和其他一些因素, 也会造成测量 σ_x 的误差。

在外场用 DC-1 对实物进行了测量, 用直径为 688 毫米的金属球作为标准球定标, 测量直径为 503 毫米的金属球, 用不同的发射功率测量了 8 次, 测得其 σ_x 的均值与理论公式计算值相差 9.8%。

同样用 688 毫米的金属球定标, 测量直径为 300 毫米的金属球, 用不同的发射功率测量了 6 次, 舍去一次偏离过大的值, 5 次测得的 σ_x 值平均, 与理论值相差 8%。

测量一锥柱裙模型, 所得曲线示于图 7。共测了五圈, 终端输出由 $x-y$ 记录仪所绘曲线很接近, 重复性良好。

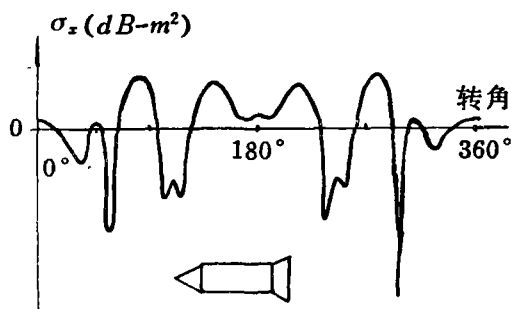


图 7 测量一锥柱裙模型所得曲线

四、进一步改进本设备的意见

以上介绍的是我们研制成功的第一套目标雷达截面积自动测量设备。经过外场试验使用, 我们认为还可以作进一步改进:

(1) 现在 DC-1 接收机的本振信号源是非相参的。如果改进为与发射信号是相参的, 再加上测量相位的装置, 就可以把回波信号的相位测出。把现在的两部接收机放在很靠近的地方, 并且配上可以变极化的天线, 则可以发展成为能够测量目标极化散射矩阵的设备。

(2) 改变发射机和接收机的高放、混频和本振等部分之后, 可以用于其他波段的测量。如果动态范围需进一步扩大, 还可以在高放或混频前后再接入适当的衰减器。

(3) 如果要求进一步提高测量精度, 须采取措施解决测试校准手段。可多次测量取其均值以减小随机误差。对于系统误差, 可以在数据处理时进行消除。(见附录)

(4) 要提高设备的可靠性, 必须采用高质量高可靠性的元件和零部件。

附 录

为提高测量精度可以采用下面的数据处理方法:

1. 为减小随机误差的处理

(1) 取 K 次测量的均值

当信号比较弱,信噪比值较小时,约有 20 分贝受噪声污染,所得的数据是随机跳动的,要通过多次测量,取其均值而减小随机误差。一次测量所得接收机输出电压 V_x 是一个标量:

$$V_x = x + v_i \quad (5)$$

式中 x 为所需要测量的电压值,

v_i 为噪声电压值。

由估值理论得知其最小二乘估值就是它的均值 \bar{V}_x [5],

$$\hat{V}_{xKLS} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K V_{x_i} = \bar{V}_{xK} \quad (6)$$

式中 \hat{V}_{xKLS} 为进行 K 次测量后计算所得的最小二乘估值,

V_{x_i} 为第 i 次测量所得之值,

\bar{V}_{xK} 为 K 次测量的均值。

(2) 子样方差 σ_x^2 的无偏估值为

$$S^2 = \hat{\sigma}_{xK}^2 = \frac{1}{K-1} \sum_{i=1}^K (V_{x_i} - \bar{V}_{xK})^2 \quad (7)$$

(3) 求置信区间

在求得 K 次测量的均值 \bar{V}_{xK} 之后,再求一个区间 $\bar{V}_{xK} \pm d$,使真均值 $\bar{\mu}_{vx} = \lim_{K \rightarrow \infty} \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K V_{x_i}$

落在此区间内的概率达到规定值。此区间称为置信区间,置信概念的信任程度称为置信系数。可根据均值 \bar{V}_{xK} 和 S^2 建立置信区间:

$$\left[\bar{V}_{xK} - \frac{St_n}{\sqrt{K}} \leq \bar{\mu}_{vx} < \bar{V}_{xK} + \frac{St_n}{\sqrt{K}} \right], n = K - 1. \quad (8)$$

相应区间的置信系数是 $1 - \alpha$ 。

式中 $t_n = \frac{(\bar{V}_{xK} - \bar{\mu}_{vx})\sqrt{K}}{\sigma_x}$, 为具有自由度为 n 的 t 分布。当已知 n , $\frac{\alpha}{2}$ 时, t_n 可由资料

[4] 的表 A.4 查得。

由 K 个测量值的子样方差 S^2 可以确定 σ_x^2 的 $1 - \alpha$ 的置信区间:

$$\left[\frac{nS^2}{x_n^2; \frac{\alpha}{2}} \leq \sigma_x^2 < \frac{nS^2}{x_n^2; 1-\frac{\alpha}{2}} \right], n = K - 1. \quad (9)$$

式中 $x_n^2; \frac{\alpha}{2}$ 为自由度为 n 的卡埃平方分布。已知 n , α 时,可由资料[4]的表 A.3 查出。

举例 测量 DC-1 的接收机输出电压,当接收机输入 50 毫伏又经衰减 65 分贝时,测量接收机的输出 $K=30$ 次,经计算得 $\bar{V}_{xK}=0.9674$ 伏,取 $\alpha=5\%$,得置信区间为

$$0.9610 \text{ 伏} \leq \bar{\mu}_{vx} < 0.9738 \text{ 伏}$$

即真均值以 95% 的置信系数落在此区间内。而方差的置信区间为

$$1.87 \times 10^{-4} \leq \sigma_x^2 < 5.33 \times 10^{-4}$$

即测量 30 次取均值,求得置信区间为 0.0128 伏,即真均值以 95% 的置信系数落在相

对值为 $\frac{0.0128}{0.9674} = 1.32\%$ 的区间内, 即经 30 次测量取均值, 精度可以达到 1% 的量级,

这是以多次测量的代价换来的。

2. 为减小系统误差的处理

经上述处理后, 可以认为真均值以 $1 - \alpha$ 的概率落在 $\bar{V}_{xK} \pm d$ 的区间内。现在再设法消除由于测量设备的非线性造成的系统误差。

将接收机输入信号 V_{x_i} 与终端模数转换部分输出信号 \bar{V}_{xK} (经多次测量取均值后) 作曲线:

曲线 a_i : 为测量设备实际输入—输出特性曲线。

直线 b_i : 为理想的线性输入输出特性。

在一定的输入信号下, 经平滑减小了随机误差之后, 仍具有系统误差。现用理想曲线 b 加以校正。在同一输入值 V_{x_i} 条件下, 把实际曲线的输出 a_i 与理想曲线的输出 b_i 一一对应起来, 即 a_1 对应 b_1 , a_2 对应 b_2 , \dots , a_n 对应 b_n , 制成对应的校正表, 存入计算机中, 当实际输出为 a_i 时, 将 a_i 校正为 b_i , 再用 b_i 进行雷达截面积的计算, 即可消除由于系统测量非线性造成的系统误差。

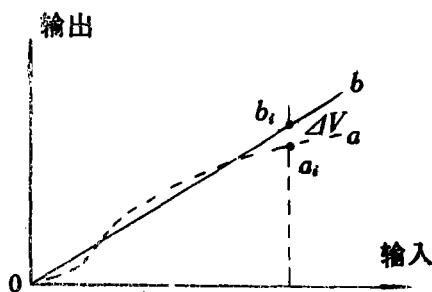


图 8 非线性系统误差曲线

故处理步骤如图 9 所示:

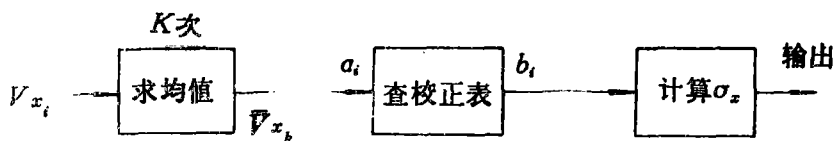


图 9 消除系统误差的处理步骤

根据信噪比的大小及所要求的测量精度, 可以决定测量次数 K 的取值。

参 考 文 献

- [1] M.I. 斯科尔尼克, “雷达手册”, 第一, 二分册, 国防工业出版社, 1974年。
- [2] 朱泉林, “雷达目标有效散射面积的测量”, 《工学学报》1978年第3期, 国防科技大学。
- [3] 楼宇希著, “雷达精度分析”, 国防工业出版社, 1979年8月。
- [4] J.S. 贝达特、A.G. 皮尔索著, 凌福根译, “随机数据分析方法”, 第四章及 414、415 页, 国防工业出版社, 1976 年 12 月。
- [5] A.P. 塞奇、J.L. 梅尔萨著, “估计理论及其在通讯与控制中的应用”, 285页, 科学出版社, 1978 年。
- [6] P.Blacksmith 等, “Introduction to Radar Cross-Section Measurements”, Proc of IEEE, 1965 年 8 月。

- [7] H.C.Marlow 等, "The RAT SCAT Cross-Section Facility", Proc of IEEE, 1965年8月。

The DC-1 Radar Cross-Section Measuring Equipment

Huang Gang-qiang

Abstract

This paper presents the applications, the performance, the method of measurement and the functional diagram of the DC-1 radar cross-section measuring equipment. Errors of measurement are preliminary analyzed. Some measured results are presented. It is also suggested how to improve such equipment.